

УДК 621.791

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ

**М.П. КУЛЬГЕЙКО, В.А. ЛЮЦКО,
Д.В. МЕЛЬНИКОВ, В.Ф. СОБОЛЕВ**

*Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого, Республика Беларусь*

Магнитно-электрическое упрочнение является одним из эффективных методов упрочнения и восстановления поверхностных слоев деталей из различных конструкционных сталей и сплавов. Оно позволяет получать покрытия с высокой износостойкостью и надежной связью нанесенного покрытия с основным материалом детали.

Сущность способа магнитно-электрического упрочнения заключается в совокупном одновременном воздействии на обрабатываемую поверхность и ферромагнитный порошок импульсов нескольких видов энергии: электрической, магнитной и механической, с помощью которых порошок расплавляется и наносится на обрабатываемую поверхность.

Анализ процессов, протекающих за время одного цикла обработки, показывает, что толщина и качество наносимых покрытий находятся в сложной зависимости от следующих факторов: силы технологического тока, магнитной индукции в зоне обработки, величины рабочего зазора между деталью и электродом-инструментом, скорости перемещения обрабатываемой поверхности детали, скорости вращения электрода-инструмента, грануляции ферромагнитного порошка и скорости его подачи в зону обработки, химического состава и электромагнитных свойств материалов порошка и детали, исходной шероховатости обрабатываемой поверхности.

Исследования магнитно-электрического упрочнения позволили выявить элементарные процессы, протекающие при установившемся режиме упрочнения:

- формирование контактного мостика и его разогрев в точках контакта;
- уменьшение длины и увеличение поперечного сечения контактного мостика;
- расплавление контактного мостика;
- стягивание жидкого мостика, полный перенос с одновременным уменьшением длины жидкого мостика;
- разрыв жидкого мостика и центробежный перенос расплава;
- образование микродуги, вращение микроплазменного шнура;
- разрыв дуги;
- физико-химические процессы на поверхности детали.

Формирование контактного мостика. Под воздействием внешнего магнитного поля в ферромагнитных зернах, поступивших из бункера дозатора в рабочий зазор, вводятся локализованные магнитные поля. Магнитное поле зерна взаимодействует с магнитными полями смежных ферромагнитных зерен в детали, стремясь замкнуться через контур, имеющий наименьшее магнитное сопротивление. В результате такого взаимодействия локализованное магнитное поле зерна, находящегося возле обрабатываемой поверхности, замыкается через деталь. Зерно, условно представленное по форме эллипсоида вращения, под действием силы магнитного поля прижимается к детали с силой F_3 , направленной по нормали к обрабатываемой поверхности:

$$F_3 = \frac{4}{3} \cdot a \cdot b^2 \cdot k \cdot H \cdot \left(\frac{\Delta H}{\Delta X} \right) \cdot \cos \alpha,$$

где b - соответственно, большая и малая ось эллипсоида зерна;

k - магнитная восприимчивость ферромагнитного порошка;

H - напряженность магнитного поля;

$\frac{\Delta H}{\Delta X}$ - градиент магнитного поля;

α - угол между наибольшей осью зерна и нормалью к обрабатываемой поверхности.

Смежные ферромагнитные зерна под воздействием своих магнитных полей прижимаются друг к другу, образуя новое, более мощное магнитное поле. Таким образом, происходит агрегатирование ферромагнитных зерен, в результате чего образуется контактный мостик, замыкающий поверхность ротора и детали. При последующем вращении ротора от начала формирования контактного мостика происходит изменение его длины за счет изменения зазора, при этом зерна порошка, которые в начальный момент соприкасались в вершинах, образуя точечный контакт, скользят по наибольшим поверхностям и образуют плотный контакт друг с другом, поверхностью детали и ротором, формируя как бы однородный электрод. В результате этого увеличивается поперечное сечение контакта, снижается сопротивление и резко увеличивается значение технологического тока.

В момент замыкания контактным мостиком электрической цепи внешнего источника тока происходит быстрое увеличение величины рабочего тока и его кругового магнитного поля. Круговое магнитное поле при взаимодействии с внешним магнитным полем, создаваемым электромагнитом, определяет механический крутящий момент ($M_{кр}$) каждого ферромагнитного зерна контактного мостика:

$$M_{кр} = \bar{P}_m \times B_p,$$

где \bar{P}_m - магнитный момент ферромагнитного зерна;

B_p - результирующая магнитная индукция на поверхности зерна

$$\bar{P}_m = n \cdot \bar{P}_{am},$$

где n - число атомов в зерне;

\bar{P}_{am} - магнитный момент атома;

$$B_p = \sqrt{B_o^2 + B_k^2},$$

где B_o - индукция внешнего магнитного поля;

B_k - индукция кругового магнитного поля, возникающего при прохождении тока через зерно.

Согласно закону полного тока имеем

$$\oint \frac{B_k}{\mu \cdot \mu_o} dl = i.$$

Откуда при допущении равномерного магнитного поля

$$B_k = \frac{i \cdot \mu \cdot \mu_o}{\pi \cdot d},$$

где μ - магнитная проницаемость среды;

μ_o - магнитная постоянная;

i - величина тока, протекающего через зерно;

d - диаметр зерна.

На зерно действует результирующий момент

$$M_p = M_{кр} - M_{тр},$$

где $M_{тр}$ - момент трения зерна.

Рассматривая зерно как цилиндр радиусом R , момент трения зерна определяем по формуле:

$$M_{тр} = \frac{2}{3} \cdot R \cdot F_m \cdot f,$$

где f - коэффициент трения.

Под действием результирующего крутящего момента ферромагнитное зерно придет во вращательное движение. В результате трения вращающегося зерна о поверхность детали выделяется некоторое количество тепловой энергии, которое способствует дополнительному разогреву поверхности детали и зерна.

Распределение контактного мостика. Через контакт мостика с деталью проходит большой ток. При этом выделяющаяся теплота сильно разогревает зону контакта.

$$Q = \int_0^t 0,24 \cdot R_k \cdot I^2 dt,$$

где R_k - сопротивление контакта;

I - величина тока, проходящего через точечный контакт.

Учитывая, что рассматриваемое явление протекает чрезвычайно быстро, можно допустить, что все тепло, выделяемое в контакте, расходуется на его разогревание. Из-за кратковременности данного процесса можно пренебречь теплопроводностью и другими факторами отвода энергии от контакта. Имеем

$$0,24 \cdot I^2 \cdot R_k dt = C \cdot m dT,$$

где C - удельная теплоемкость металла;

m - масса металла, осуществляющего контакт;

T - температура контакта.

Так как плотность тока в месте контакта мостика с деталью достигает больших значений, можно предположить, что плавление зерна, контактирующего с изделием, происходит на почти прямолинейном участке кривой нарастания тока со временем.

Следовательно, допустимо предположение, что до испарения металла и заполнения рабочего зазора парами ток повышается по закону

$$I = b \cdot t,$$

где b - коэффициент пропорциональности,

тогда

$$0,24 \cdot b^2 \cdot R_k \cdot t^2 dt = C \cdot m dT.$$

С повышением температуры контактного мостика увеличивается и сопротивление контакта

$$R_k(T) = R_o \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot T \right),$$

где R_o - сопротивление в области стягивания в ненагретом состоянии,

α - температурный коэффициент сопротивления.

Удельная теплоемкость меняется с температурой значительно слабее, чем удельное сопротивление.

Поэтому

$$\frac{0,24 \cdot b^2 \cdot R_o}{c \cdot m} \cdot t^2 dt = \frac{dT}{1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot T}.$$

После интегрирования дифференциального уравнения получим

$$\frac{0,053 \cdot \alpha \cdot b^2 \cdot R_o \cdot t^3}{c \cdot m} = \ln\left(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot T\right),$$

откуда с учетом предельных условий имеем:

$$T = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \left[\exp\left(\frac{0,053 \cdot \alpha \cdot b^2 \cdot R_o \cdot t^3}{c \cdot m}\right) - 1 \right].$$

Масса металла, осуществляющая контакт между мостиком и деталью, выраженная через эффективные значения длины l , поперечного сечения S и плотности γ , равна

$$m = l \cdot S \cdot \gamma.$$

Тогда уравнение, характеризующее изменение температуры в области контакта ферромагнитного зерна с деталью, примет вид

$$T = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \left[\exp\left(\frac{0,053 \cdot \alpha \cdot b^2 \cdot R_o \cdot t^3}{c \cdot \gamma \cdot S^2}\right) - 1 \right].$$

Из формулы следует, что температура контакта растет чрезвычайно быстро.

Под действием тепла зерна контактного мостика быстро расплавляются, образуя в рабочем зазоре жидкий металлический мостик.

Стягивание жидкого мостика. При протекании электрического тока через жидкий мостик в нем под действием собственного магнитного поля тока возникает радиально направленная сжимающая сила (пинч-эффект):

$$P_{pad} = \frac{\mu \cdot I \cdot \delta}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right),$$

где δ - плотность тока;

μ - магнитная проницаемость материала проводника;

R - радиус мостика;

r - радиус рассматриваемого кольцевого слоя мостика.

На жидкий мостик оказывает сжимающее действие и сила поверхностного натяжения

$$P_{n,n} = G \cdot 2 \cdot \pi \cdot R,$$

где G - коэффициент поверхностного натяжения расплавленного металла.

Под действием радиальной составляющей пинч-эффекта и силы поверхностного натяжения жидкий мостик принимает форму гиперболоида вращения, вследствие чего появляется и осевая составляющая пинч-эффекта (P_{oc}), которая направлена в сторону большего сечения. Величина этой силы определяется выражением:

$$P_{oc} = \frac{\mu \cdot I^2}{4 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2},$$

где R_1 и R_2 - радиусы наибольшего и наименьшего сечений мостика $R_1 > R_2$.

В образовавшейся шейке мостика плотность тока возрастает настолько, что превышает некоторые критические значения, при котором проводимость жидкого металла становится ионной.

В результате сложного электронно-ионного процесса, протекающего при очень высоких температурах, происходит перемещение расплавленного ферромагнитного порошкового материала к детали.

Разрыв жидкого мостика, мостиковый перенос порошкового материала. При разрыве жидкого металлического мостика часть расплава ферропорошка переносится на поверхность детали (мостиковый перенос). При мостиковом переносе металла имеет место соотношение

$$V = C \cdot I^3,$$

где V - объем мостика;

C - коэффициент.

Следовательно, токовый режим процесса упрочнения может оказывать существенное влияние на количество расплава ферропорошка, перенесенного на обрабатываемую поверхность детали.

Образование микродуги. Следует отметить, что микровзрывной процесс, протекающий при разрыве жидкого мостика приводит к образованию в рабочем зазоре высокопроводной микроплазмы, которая довольно быстро развивается в нормальную короткую дугу. Длина ее зависит в основном от энергии, выделяющейся при разрыве мостика.

Магнитное поле в зазоре воздействует на плазму дуги (так называемый шнур) с такой же механической силой, как на любой проводник тех же размеров, несущий тот же ток. К элементам дуги, имеющим составляющую, перпендикулярную к вектору магнитной индукции, будет приложена электромагнитная сила, равная

$$d\vec{F} = i \cdot [d\vec{l} \cdot \vec{B}].$$

Под действием этой силы элемент дуги придет во вращательное движение с некоторым ускорением, в результате чего шнур станет закручиваться, образуя коническую спираль. В результате горения микродуги на поверхность детали также переносится ферромагнитный порошок. На этой стадии процесса может иметь место соотношение.

$$\frac{dG}{dt_a} \sim I,$$

где G - масса перенесенного материала;

t_a - длительность горения микродуги.

По истечении некоторого времени короткая дуга переходит в так называемую плазменную дугу. При горении плазменной дуги обычно происходит частичное снятие ранее нанесенного покрытия. Тогда массу ферромагнитного порошка, нанесенного на поверхность детали, можно представить выражением:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 - G_4,$$

где G_1 - ионный перенос материала в жидком мостике;

G_2 - мостиковый перенос;

G_3 - перенос ферромагнитного порошка при горении короткой (бесплазменной) дуги;

G_4 - обычно отрицательный (от катода к аноду) перенос металла при горении плазменной дуги.

Электромагнитное воздействие на расплав микрованны. На жидкий металл микрованны действуют пондеромоторные силы электромагнитного происхождения.

Направление этих сил зависит от взаимной ориентации внешнего магнитного поля и тока, текущего по микроразлаву расплава.

Наличие поперечных составляющих поперечных сил в микроразлаве приводит к частичному выбросу жидкой фазы с поверхности детали, что также влияет на толщину металлопокрытия.

Физико-химические явления при формировании покрытий. Процесс нанесения покрытий можно отнести к классу топохимических реакций, для которых характерным является трехстадийность процесса образования прочных связей между атомами ферромагнитного порошка и материала детали.

На первой стадии происходит образование физического контакта, т.е. осуществляется сближение ферромагнитного порошкового материала и детали на расстояния, требуемые для межатомного взаимодействия, и подготовка поверхностей к взаимодействию. При этом определяющую роль играет агрегатное состояние частиц ферромагнитного порошка, перенесенных на поверхность детали. Расплавленные частицы ферромагнитного порошка под воздействием внешних сил весьма быстро растекаются по поверхности детали и большая группа атомов расплава, обладающих запасом свободной энергии, входит в контакт с атомами материала детали. Из элементарных процессов на этой стадии топохимической реакции важную роль играют процессы электростатического взаимодействия поверхностных атомов.

На второй стадии топохимической реакции происходит химическое взаимодействие атомов. Установление прочных химических связей определяется природой взаимодействующих материалов. Интенсивность взаимодействия частиц ферропорошка, перенесенных на поверхность детали, зависит не только от их активности, но и от активации поверхностных атомов детали.

На третьей стадии протекают диффузионные процессы в микроразлаве расплава на границе контакта жидкой и твердой фаз. Так как переход атомной системы в новое состояние осуществляется за некоторый промежуток времени, то на границе фаз наблюдается пик межфазной энергии. Поэтому следует ожидать запаздывания химического взаимодействия фаз, а также задержки (ретардации) диффузионных переходов атомов из одного состояния в другое, пока атом не приобретет энергии, необходимой для преодоления межфазного барьера.

После завершения топохимической реакции возможно протекание процессов релаксационного характера, которые в зависимости от химического состава материалов ферромагнитного порошка и детали могут привести к снижению прочности соединения металлопокрытия с основой. Снижение прочности может происходить за счет рекристаллизации или образования прослоек из хрупких химических соединений.

Литература

1. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электрохимической обработкой. - Л.: Машиностроение, 1977.
2. Акулович Б.М. К вопросу о формировании упрочненного слоя при магнитоэлектрическом упрочнении. - В кн.: Магнитно-абразивное полирование деталей. - М.: Издательство ФТИ АН БССР, 1976.
3. Архипов В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин плазменной наплавкой. - М.: БелНИИТИ, 1973.
4. Акулович Л.М., Сакулович Ф.Ю. Износостойкость деталей после магнитоэлектрического упрочнения. - В кн.: Магнитно-абразивное полирование деталей. - М.: ФТИ АН БССР, 1976.

5. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. –Л.: Машиностроение, 1986.
6. Лазаренко Б.Р. Электрические способы обработки металлов и их применение в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1978.
7. Ярошевич В.К. и др. Электроконтактное упрочнение. – Мн.: Наука и техника, 1982.